第 37 卷第 8 期　　生　态　学　报　　Vol.37,No.8
2017 年 4 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Apr.,2017

DOI:10.5846/stxb201512242568

陈云,冯佳伟,牛帅,许宁,韩军旺,叶永忠,袁志良.小秦岭自然保护区苔藓植物群落数量分类、排序及多样性垂直格局.生态学报,2017,37(8):2653-2664.

Chen Y, Feng J W, Niu S, Xu N, Han J W, Ye Y Z, Yuan Z L.Numerical classification, ordination, and species diversity of bryophytes along elevation gradients in Xiaoqinling.Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2653-2664.

小秦岭自然保护区苔藓植物群落数量分类、排序及多样性垂直格局

陈　云[1],冯佳伟[2],牛　帅[2],许　宁[2],韩军旺[3],叶永忠[2],袁志良[2,*]

1 河南农业大学林学院,郑州　450002

2 河南农业大生命科学学院,郑州　450002

3 河南小秦岭国家级自然保护区管理局,灵宝　472500

摘要:苔藓物种多样性沿海拔梯度呈什么样的分布格局? 基于 53 个 20 m×20 m 样地,采集并鉴定了样地内所有生境中的苔藓物种;采用多元回归树(multivariate regression trees, MRT)对苔藓植物进行分类;采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)进行排序分析;用广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)研究苔藓物种多样性沿海拔的分布格局。结果如下:(1)采集的 1378 份苔藓植物标本经过鉴定,共有 33 科 89 属 240 种,其中藓类 226 种,苔类 14 种;(2)经交叉验证认为本区苔藓植物可分为 4 类,Ⅰ长肋青藓(*Brachythecium populeum*)+大叶匐灯藓(*Plagiomnium succulentum*)+圆叶匐灯藓(Plagiomnium vesicatum)群落,Ⅱ灰白青藓(*Brachythecium albicans*)+宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)+短肋羽藓(*Thuidium kanedae*)+平肋提灯藓(*Mnium laevinerve*)群落,Ⅲ短肋羽藓(*Thuidium kanedae*)+光萼叶苔(*Jungermannia leiantha*)+薄罗藓(*Leskea polycarpa*)+叉肋藓(*Trachyphyllum inflexum*)群落,Ⅳ宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)+垂蒴棉藓(*Plagiothecium nemorale*)+全缘匐灯藓(*Plagiomnium integrum*)群落;(3)海拔、坡度和坡向对苔藓物种分布的解释量为 7.29%;(4)苔藓物种多样性随海拔的变化成明显的上升格局。通过研究了解了小秦岭国家级自然保护区苔藓物种组成、群丛划分以及每种苔藓植物的海拔分布范围;苔藓物种多样性随海拔的上升呈显著的上升格局,与乔木、灌木和草本的分布格局不同。希望此研究能为苔藓植物生态学研究和物种多样性保护提供参考。

关键词:多元回归树;典范对应分析;海拔;物种多样性;苔藓

Numerical classification, ordination, and species diversity of bryophytes along elevation gradients in Xiaoqinling

CHEN Yun[1], FENG Jiawei[2], NIU Shuai[2], XU Ning[2], HAN Junwang[3], YE Yongzhong[2], YUAN Zhiliang[2,*]

1 *College of Forestry, Henan Agricultural Universit, Zhengzhou* 450002, *China*

2 *College of Life Sciences, Henan Agricultural Universit, Zhengzhou* 450002, *China*

3 *Administration Bureau of Xiaoqinling National Nature Reserve of Henan, Lingbao* 472500, *China*

Abstract: Bryophytes are widely distributed and constitute an important part in vegetation diversity. More than 20,000 species of bryophytes are found worldwide. Bryophytes play important roles in the ecosystem, particularly in water balance and nutrient accumulation. However, bryophytes are smaller than vascular plants and are often ignored in ecological studies. Spatial patterns of species diversity along the elevation gradient are of great significance in illuminating community ecology. What is the distribution pattern of bryophyte species diversity along an elevation gradient? We do not find the related

基金项目:河南省科技攻关(132102110133);河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A180013)

收稿日期:2015-12-24;　　**网络出版日期**:2016-10-19

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zlyuan163@163.com

research in China. The Xiaoqinling National Nature Reserve is located in Lingbao (34°23′—34°31′N, 110°23′—110°44′E, Henan Province, China). This nature reserve covers 31 km from east to west and 12 km from north to south, and spreads over a total area of 15,160 km^2. The reserve harbors the highest peak in Henan, with an elevation of 2413.8 m. The area has rich biological resources with a diverse and complex vegetation composition. We constructed 53 plots in a 400m^2 area (20 m × 20 m) along the altitudinal gradient in Xiaoqinling, collected all bryophyte species encountered in these 53 plots, and recorded habitat types such as ground, tree trunks, roots, and rotten wood. Investigators carefully checked every corner of each plot to collect all bryophyte species growing on the plot. A total of 1378 specimens were collected. All specimens were transported back to the laboratory and identified. The bryophyte community was classified using multiple regression trees. Ordination analysis was conducted by canonical correspondence analysis, and the generalized linear model was used to study the distribution pattern of species diversity along elevation gradients. Results were as follows. (1) The collected 1378 bryophyte specimens belonged to 33 families, 89 genera, and 240 species, including 226 species of mosses and 14 species of liverworts. (2) The bryophyte community was divided into four categories by cross validation: I: *Brachythecium populeum* + *Plagiomnium succulentum* + *Plagiomnium vesicatum*; II: *Brachythecium albicans* + *Brachythecium curtum* + *Thuidium kanedae* + *Mnium laevinerve*; III: *Thuidium kanedae* + *Jungermannia leiantha* + *Leskea polycarpa* + *Trachyphyllum inflexum*; IV: *Brachythecium curtum* + *Plagiothecium nemorale* + *Plagiomnium integrum*. (3) The interpretation of the elevation, slope, and aspect to the distribution of the bryophyte species was 7.29%. (4) The bryophyte species diversity increased with the increase in altitude. In this study, we examined the species composition, classification, and distribution range along elevation gradients of the bryophyte species in Xiaoqinling. The diversity of the bryophyte species along the altitude showed an increasing tendency and differed from the distribution patterns of trees, shrubs, and herbs. Thus, this study provides a reference for research on bryophyte species coexistence and protection of species diversity. Vascular plants and bryophytes coexist in an ecosystem and the relationship between vascular plants and the bryophyte community is complex. However, we did not consider the effect of vascular plants on the bryophyte community and these factors need further analysis. Environmental factors, such as climatic conditions, physical and chemical properties of bark, and light intensity, must also be considered in future studies.

Key Words: MRT; CCA; elevation; species diversity; bryophyte

苔藓是森林生态系统的重要组分,在森林动态变化过程中扮演着重要的作用[1]。在林业上,苔藓是划分森林类型的辅助指标,并且被作为监测环境的指示植物[2]。然而苔藓植物个体相对较小,缺乏广泛的经济价值,因此很少成为人们关注的焦点,其相关生态学研究也相当薄弱[3-4]。

植被群落分类和排序是植被生态学研究中最基本的问题[5]。目前,常用的植被群落数量分类方法有聚类分析、双向指示种分析和多元回归树[6-7]。其中多元回归树是一种较新的群落数量分类方法,较聚类分析和双向指示种分析更加客观[8]。目前围绕维管植物群落分类进行了较多的研究[9-11]。但对于苔藓植物分类,通过查阅文献仅发现,郭水良等首次在国内采用双向指示种分析,对长白山苔藓植物进行了分类[2]。随后张元明等也采用双向指示种分析,对新疆博格达山地地面生苔藓进行了分类[12]。苔藓植物分类研究较少,并且没有发现采用多元回归树对苔藓植物进行划分的相关研究。

海拔作为地理梯度,包含了温度、湿度和光照等各种环境因子,被认为是植物物种、植物区系、植物群落和生态系统的决定因素[13]。山地植被物种多样性随海拔梯度的变化规律也一直是生态学家感兴趣的问题[14-15]。维管植物多样性沿海拔梯度的分布格局已有了大量的研究,分布格局主要有 5 种形式,分别是随海拔升高先降低后升高、先升高后降低、单调升高、单调下降和没有明显格局[14,16]。然而苔藓物种多样性沿海拔梯度呈什么样的格局?在国内没有发现相关报道。

本研究基于 53 个 20 m×20 m 样地,采集并鉴定了样地内所有生境中的苔藓物种,采用 MTR、CCA 和 GLM

等分析方法,探讨了以下问题:(1)小秦岭地区苔藓植物组成,以及优势科和优势种;(2)综合分析苔藓植物之间及苔藓植物与地形因子之间的关系;(3)苔藓物种多样性沿海拔梯度呈什么样的分布格局? 与乔木、灌木和草本的分布格局是否一致?

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

小秦岭国家级自然保护区位于河南省灵宝市西部(34°23′—34°31′N,110°23′—110°44′E),保护区东西长 31 km,南北宽 12 km,全区面积 15160 hm^2。森林覆盖率 81.2%,其主峰老鸦岔垴海拔 2413.8 m,为河南省最高峰。本区位于暖温带大陆性气候区,属季风型半干旱气候,年均气温 11.2—14.2℃,极端最低温度-17℃,极端最高温度 42.7℃,无霜期 170—215 d,年降水量 620 mm 左右。

1.2　样地设置

2012 年,在保护区主峰老鸦岔垴,从海拔 1020 m 到 2413 m 设置样地。海拔每上升 50 m,选择代表性的群落分别设置样地,样地大小为 20 m×20 m,共计 53 个样地。在样地内,从地面到地上 2 m 范围内,对样地内所有岩石、枯倒木、地面及木本植物个体上等所有苔藓进行采样,样地中同一棵树或同一块石头的不同高度和方位的苔藓都需要采样,而同一点位置上同种苔藓物种只采标本一份,同一点位置不同种苔藓都要采集,标本存放于信封中并记录样方号和生境类型。采集过程中仔细检查样地每个角落,尽最大努力做到不遗漏,共收集到苔藓标本 1378 份。所有标本带回实验室通过显微镜鉴定到种,凭证标本存放于河南农业大学标本馆苔藓标本室。同时通过 GPS 测量每个样地的海拔,地质罗盘测量坡度和坡向。

1.3　苔藓植物物种多度的计算

物种多度一般指的是群落中某物种个体数量。传统的经典取样方法通常是在 10 cm×10 cm、20 cm×20 cm 或 50 cm×50 cm 等小尺度上进行采样[17-20]。然后通过不同的方法计算物种个体在样方内的物种个体数,从而得到多度。这种方式对于研究小尺度上苔藓物种多样性、苔藓结皮及树木与附生苔藓之间的关系等方面效果较好。然而这种方法限制了在大尺度上苔藓生态学的发展。

为了有利于从宏观的角度来研究苔藓植物,研究参考了贾宏汝对苔藓物种多度的处理方式[21],即某一苔藓物种而言,只关注该物种在样地中哪一棵树、哪一块石头或者哪一斑块地面出现了,不关注它在该棵树、该块石头或者该斑块地面上同种个体的数量信息,也就说该苔藓物种在某个点上有或没有,从而得到苔藓的多度信息。

1.4　物种多样性指数计算

计算每个样地内苔藓植物的生物多样性。

(1)Patrick 丰富度指数

$$D = S \qquad (1)$$

(2)β 多样性指数

$$\beta = 1 - 2c/(a+b) \qquad (2)$$

式中,S 为样地中的物种数目,a 和 b 是两个样地各自所单独拥有的物种数,c 是两样地间共有的物种数。

1.5　多元回归树

本研究采用 53 个样地海拔、坡向和坡度为自变量,240 种苔藓植物在 53 个样地内的多度为因变量进行群丛分类。MRT 采用 R 语言“mvpart”程序包进行运算[22]。

1.6　排序分析

CCA 分析中的物种矩阵选择苔藓物种在样地中的多度组成(多度大于 3 的物种)。环境矩阵由海拔、坡向和坡度组成,分析过程中对数据进行了标准化处理。通过 R 软件中 envfit 函数检验每个环境因子与苔藓物种分布的显著性,模拟次数选择 999 次[23]。同时对 CCA 的最终结果进行蒙特卡罗置换检验,分析模型是否

达到显著水平(P<0.05)。CCA 分析及显著性检验通过 R 语言软件中"Vegan"程序包实现[24]。

1.7 广义线性回归

苔藓物种多样性作为响应变量,地形因子作为解释变量。通过模型线性拟合来描述苔藓物种多样性随地形因子的变化格局。线性模型和作图通过 R 语言软件中"car"程序包实现[25]。

2 结果

2.1 苔藓物种多样性

采集的 1378 份苔藓植物标本经过室内鉴定,共有 33 科 89 属 240 种。其中藓类 24 科 79 属 226 种,占总物种数的 94.2%;苔类 9 科 10 属 14 种,仅占总物种数的 5.8%,丰富度较低。53 个样地苔藓物种多样性概况如表 1 所示。小秦岭自然保护区苔藓植物的优势科和多度排前 10 位的物种概况如表 2 所示。不同生境中的苔藓物种多样性差异如图 1 所示。附表为小秦岭自然保护区苔藓植物物种名录和区系分布(附表)。

表 1 各样地基本概况

Table 1 Overview of the plots

样地编号 No.	苔藓物种多样性 Bryophytes diversity	苔类多样性 Liverworts diversity	藓类多样性 Moss diversity	科多样性 Families diversity	属多样性 Generas diversity	海拔 Elevation/m
1	12	1	11	8	10	1020
2	8	0	8	6	6	1073
3	14	1	13	7	9	1143
4	14	1	13	8	9	1170
5	9	0	9	6	7	1176
6	5	0	5	4	4	1220
7	7	0	7	3	3	1230
8	13	0	13	5	7	1270
9	10	0	10	5	5	1282
10	16	0	16	7	12	1320
11	12	1	11	8	9	1320
12	16	2	14	9	11	1370
13	9	1	8	6	8	1370
14	20	0	20	8	12	1420
15	12	0	12	7	11	1430
16	20	0	20	7	11	1470
17	14	0	14	6	9	1470
18	12	0	12	5	8	1520
19	22	0	22	8	11	1530
20	14	0	14	9	11	1570
21	17	1	16	9	13	1585
22	13	1	12	10	11	1620
23	17	1	16	11	13	1635
24	7	0	7	3	3	1660
25	14	2	12	8	10	1670
26	2	0	2	2	2	1720
27	24	0	24	9	18	1730
28	16	0	16	7	11	1770
29	5	0	5	5	5	1779
30	21	1	20	9	10	1820

续表

样地编号 No.	苔藓物种多样性 Bryophytes diversity	苔类多样性 Liverworts diversity	藓类多样性 Moss diversity	科多样性 Families diversity	属多样性 Generas diversity	海拔 Elevation/m
31	19	1	18	7	11	1830
32	14	1	13	10	12	1870
33	7	0	7	3	4	1870
34	29	2	27	14	23	1920
35	15	2	13	9	13	1923
36	19	1	18	9	13	1970
37	26	2	24	11	17	1970
38	7	0	7	5	5	2020
39	20	1	19	12	14	2020
40	10	0	10	7	10	2075
41	25	2	23	13	18	2080
42	23	1	22	13	18	2120
43	21	0	21	8	16	2186
44	9	1	8	7	9	2220
45	13	2	11	7	9	2284
46	26	4	22	13	17	2303
47	26	2	24	13	19	2315
48	11	0	11	6	7	2324
49	26	1	25	8	12	2339
50	17	2	15	8	12	2350
51	18	0	18	9	15	2378
52	21	1	20	12	15	2400
53	30	4	26	14	19	2413

表 2　优势科的属、种统计及多度排前 10 位的物种

Table 2　Statistics of number of genera and species in dominant families and abundance in dominant species

编号 No.	科名 Families	属数 Generas	种数 Species	物种名 Species name	多度 Abundance
1	青藓科 Bryaceae	6	41	长肋青藓 *Brachythecium populeum*	96
2	提灯藓科 Mniaceae	4	24	灰白青藓 *Brachythecium albicans*	95
3	灰藓科 Hypnaceae	12	29	圆叶匐灯藓 *Plagiomnium vesicatum*	78
4	羽藓科 Thuidiaceae	5	19	宽叶青藓 *Brachythecium curtum*	74
5	丛藓科 Pottiaceae	14	23	大叶匐灯藓 *Plagiomnium succulentum*	61
6	绢藓科 Entodontacae	2	13	尖叶匐灯藓 *Plagiomnium acutum*	48
7	牛舌藓科 Anomodontaceae	4	10	平肋提灯藓 *Mnium laevinerve*	48
8	叶苔科 Jungermanniaceae	1	2	短肋羽藓 *Thuidium kanedae*	47
9	薄罗藓科 Leskeaceae	3	6	鳞叶藓 *Taxiphyllum taxirameum*	46
10	锦藓科 Sematophyllaceae	2	3	全缘匐灯藓 *Plagiomnium integrum*	41

2.2　分类结果

MRT 能兼顾误差,又能保证树的规模足够小[8],以二岐式分割法将 53 个样地分类,经过交叉验证,结合宋永昌关于群丛的命名原则[26],认为可以分为 4 类(图 2)。

Ⅰ　长肋青藓(*Brachythecium populeum*)+大叶匐灯藓(*Plagiomnium succulentum*)+圆叶匐灯藓(*Plagiomnium vesicatum*)群落,包括 1—35 号样地,该群落主要分布在海拔 1020—1923 m。

Ⅱ 灰白青藓(*Brachythecium albicans*)+宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)+短肋羽藓(*Thuidium kanedae*)+平肋提灯藓(*Mnium laevinerve*) 群落,包括 42—53 号样地,该群落主要分布在海拔 1970—2080 m 的地带。

Ⅲ 短肋羽藓(*Thuidium kanedae*)+光萼叶苔(*Jungermannia leiantha*)+薄罗藓(*Leskea polycarpa*)+叉肋藓(*Trachyphyllum inflexum*) 群落,包括 36,37,38 和 40 号样地,该群落主要分布在海拔 1970—2075 m。

Ⅳ 宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)+垂蒴棉藓(*Plagiothecium nemorale*)+全缘匐灯藓(*Plagiomnium integrum*) 群落,包括 39 和 41 号样地,该群落分布在海拔 2020—2080 m。

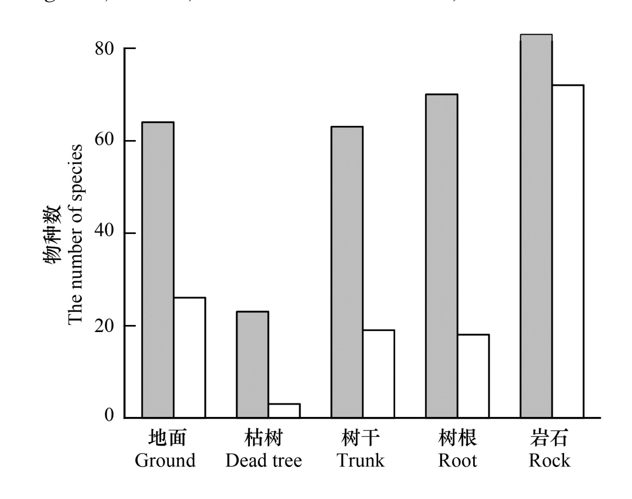


图 1 不同生境中苔藓物种多样性差异

Fig.1 Bryophytes diversity between different habitats

白色代表只在该生境中出现的物种数,灰色代表在多个生境中出现的物种数

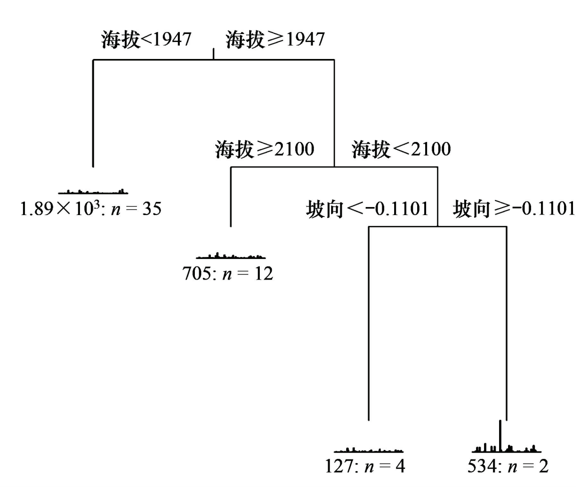


图 2 小秦岭自然保护区苔藓植物 MRT 分类

Fig. 2 Dendrogram of the multivariate regression trees classification of the bryophyte community in Xiaoqinling Nature Reserve

2.3 排序结果

对排序结果进行蒙特卡罗检验,显著性小于 0.05,说明排序的结果可以接受地形因子对物种分布的解释量,排序结果如图 3 所示。每个环境因子的显著性如表 3 所示。海拔、坡度和坡向三者的解释量为 7.29%,其中第一轴的特征值为 21.85%,第二轴的特征值为 15.83%。苔藓在排序轴上的分布基本反映了植物空间分布特征随地形因子的变化趋势。

表 3 环境因子的显著性检验

Table 3 The result of significance test of environmental factors

环境因子 Environmental factors	CCA1	CCA2	R^2	$Pr(>r)$
海拔 Elevation	0.99704	−0.07683	0.7041	0.001 ***
坡度 Slope	−0.12824	−0.99174	0.5145	0.001 ***
坡向 Aspect	0.51398	−0.85780	0.2324	0.008 **

2.4 苔藓物种多样性沿海拔梯度分布格局

苔藓物种丰富度与海拔表现出极显著相关($P<0.001$),而与坡度和坡向未能达到显著水平;苔藓 β 多样性与海拔、坡度和坡向均未达到显著水平。苔藓物种多样性和 β 多样性随海拔的变化格局分别如图 4 所示。苔藓物种多样性随海拔的变化成明显的上升格局,而苔藓 β 多样性随海拔的变化呈水平变化。

每种苔藓物种(个体数>3)的海拔分布范围如图 5 所示。长肋青藓、灰白青藓、圆叶匐灯藓和宽叶青藓等物种的海拔分布极为广泛,在海拔 1020—2378 m 都有分布,而丛本藓(*Anoectangium aestivum*)、狭叶小羽藓(*Haplocladium angustifolium*)和灰白青藓(*Brachythecium albicans*)等物种海拔分布范围较窄。

3 讨论

通过对小秦岭地区苔藓植物的调查研究表明,该保护区的苔藓植物比较丰富。苔类植物总数远小于藓类,这与汪岱华等的研究结果是一致的[27]。青藓科(Bryaceae)、提灯藓科(Mniaceae)、灰藓科(Hypnaceae)和羽藓科(Thuidiaceae),该 4 科的物种数占总物种数的 47%,是小秦岭国家自然保护区的主要类群。长肋青藓(*Brachythecium populeum*)、灰白青藓(*Brachythecium albicans*)、圆叶匐灯藓(*Plagiomnium vesicatum*)和宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)为小秦岭自然保护区的常见种。

本次研究结果显示,不同的生境中苔藓多样性差异较大,在样地中约有 57.5%物种只倾向于分布某一类生境中,这就表明生境异质性有助于丰富苔藓物种多样性,这也是在有些森林实施管理中要保持生境类型多样性的主要原因。

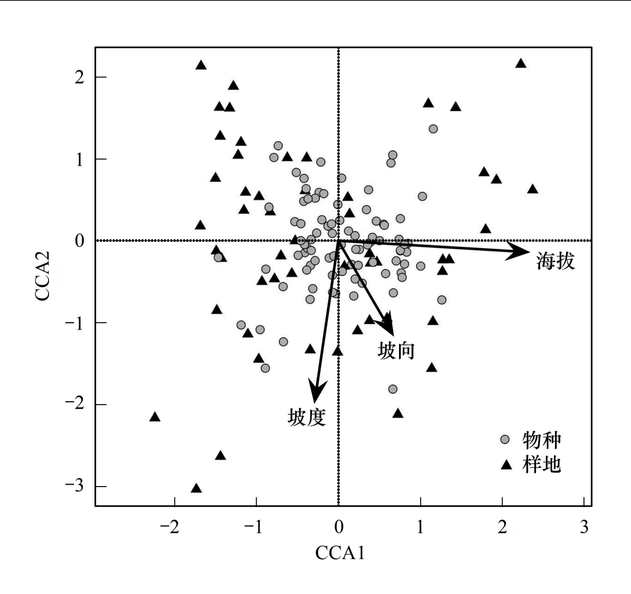


图 3　苔藓物种分布与地形因子的关系

Fig.3　Relationship between topography factors and bryophyte species distribution

图中圆点和三角形分别代表物种和样地

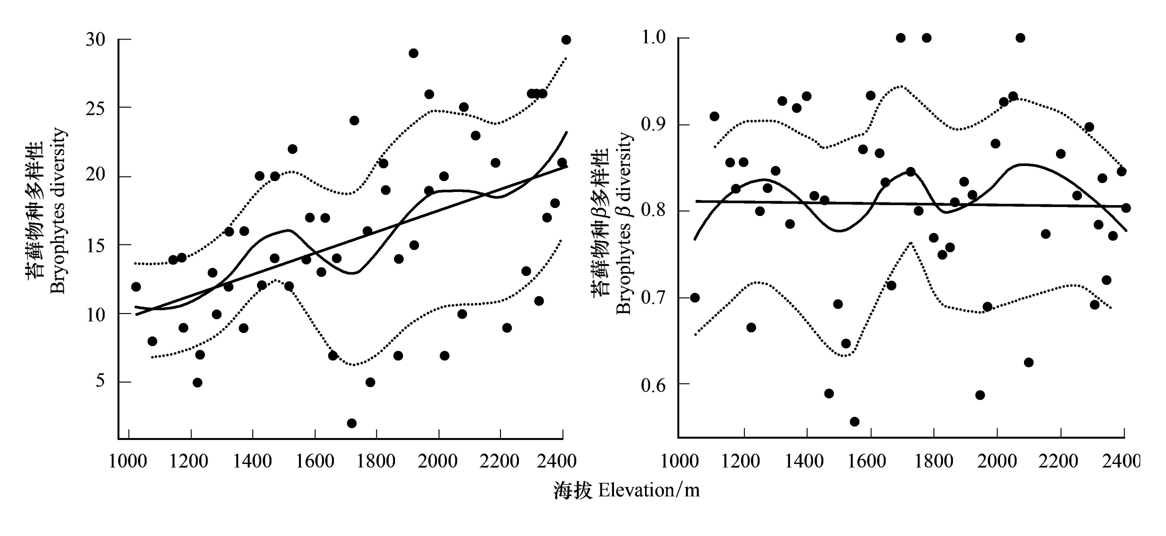


图 4　苔藓物种多样性沿海拔分布格局

Fig.4　distribution pattern of bryophyte species diversity along elevation gradients

基于地形因子和物种组成数据的 MRT 技术将小秦岭自然护区 53 块样地的 240 种苔藓分成了 4 类,结果显示 4 个群落都有各自的物种组成和群落特征。通过 CCA 分析表明海拔、坡度和坡向显著影响着苔藓物种分布。不同的海拔梯度上温度、降水及空气湿度等存在很大差异[28],不同坡度和坡向的土壤水分和养分含量也存在一定的差异[29-30]。因此,海拔、坡度和坡向 3 个地形因子显著影响着苔藓植物的分布。但三者的解释量只有 7.29%,解释量较低,并且影响苔藓物种分布的环境因子也较多,今后的研究应逐步考虑气候条件、树皮的理化性质及光照强度等更多的环境因子。

本研究结果表明小秦岭地区苔藓物种多样性随海拔的上升呈显著的上升格局。Stehn 等在阿巴拉契亚山区研究也表明苔藓物种多样性随海拔的上升呈上升格局[31],本研究结果与其是一致。陈云等在小秦岭地区研究了乔木、灌木和草本随海拔的变化格局,结果显示乔木层物种丰富度呈单峰曲线,灌木层的丰富度在中海拔呈下降趋势,草本层物种丰富度沿海拔梯度呈下降趋势[32]。苔藓物种与乔木、灌木和草本随海拔的变化呈

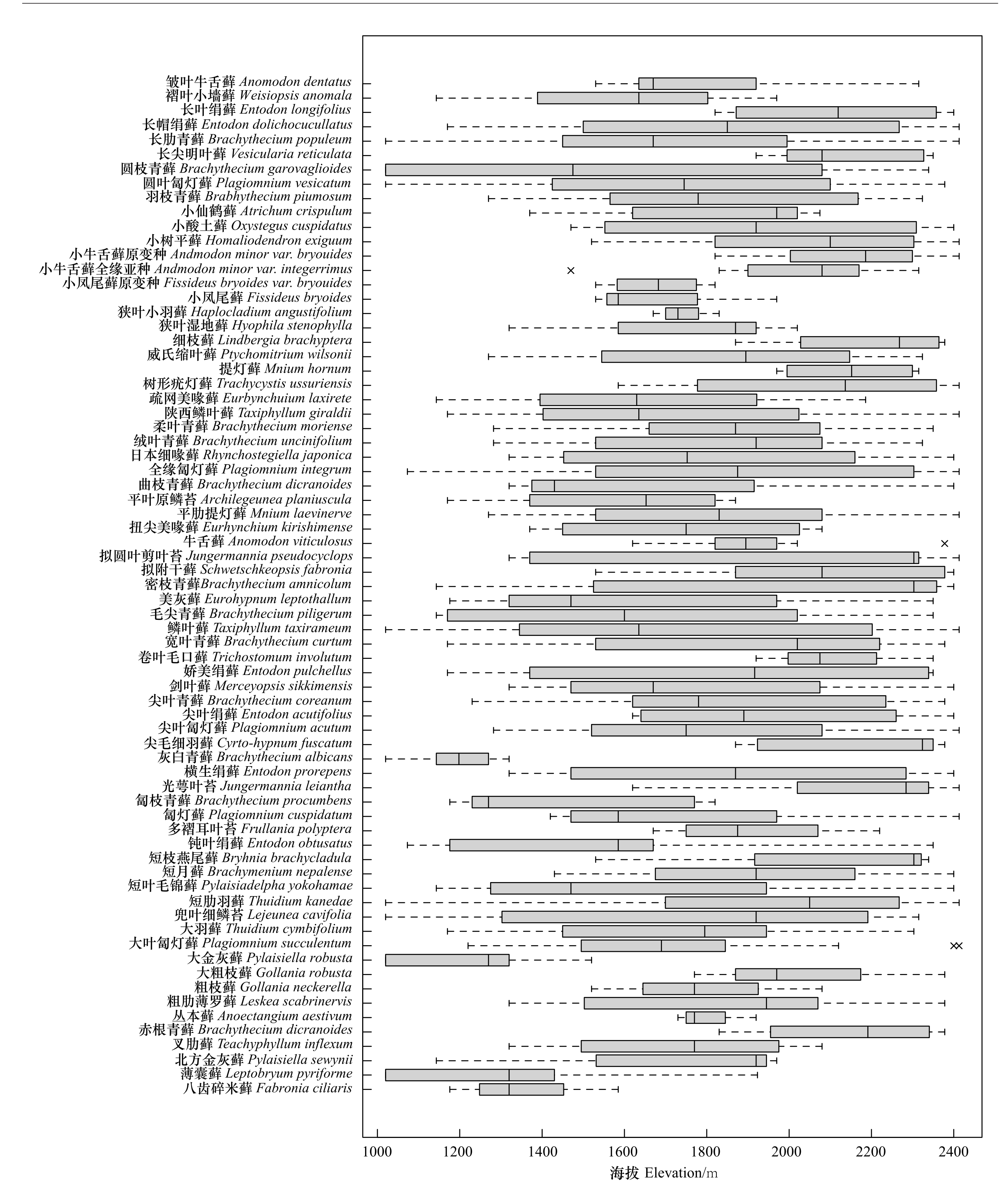


图 5　小秦岭自然保护区苔藓物种的海拔分布范围

Fig.5　The elevation range of bryophyte species distribution in Xiaoqinling nature reserve

现出不一样的格局,这就表明苔藓物种生长所需要的环境条件和乔木、灌木、草本是有很大差异。海拔对苔藓 β 多样性的影响未能达到显著水平,这可能是因为苔藓个体小,受局部微生境影响较大。

以上分析已表明海拔显著影响着苔藓植物的分布,那么每种苔藓物种在海拔上是怎样分布的? 结果表明不同苔藓的海拔生长范围存在较大差异,特别是一些海拔分布范围较窄的物种,说明这些物种对环境适应能

力差,因此苔藓物种保护过程中应多关注这些物种,并且要针对不同物种和不同海拔段实施不同的保护措施。

总的来说,通过本研究了解了小秦岭国家级自然保护区苔藓物种组成、分类以及每种苔藓植物的海拔分布范围;苔藓物种多样性随海拔的上升呈显著的上升格局,与乔木、灌木和草本的变化格局不同。希望此研究能为苔藓植物生态学研究和物种多样性保护提供参考资料。然而,维管植物和苔藓共存于一个生态系统中,本文未能考虑它们对苔藓群落的影响,当然,维管植物与苔藓群落之间的关系也是非常复杂的,维管植物究竟怎样影响着苔藓群落? 例如,乔木、灌木和草本分别是如何影响苔藓物种分布的? 不同生境中的苔藓(树生苔藓、地面生苔藓、石生苔藓等)与维管植物之间存在怎样的关系? 这些问题都有待于深入研究。

致谢:中国科学院植物研究所贾渝老师帮助苔藓鉴定,特此致谢。

参考文献(References):

[1] 雷波, 包维楷, 贾渝. 6 种人工针叶幼林下地表苔藓植物层片的物种多样性与结构特征. 植物生态学报, 2004, 28(5): 594-600.

[2] 郭水良, 曹同. 长白山地区森林生态系统树附生苔藓植物群落分布格局研究. 植物生态学报, 2000, 24(4): 442-450.

[3] 叶吉, 郝占庆, 于德永, 闫海冰, 封德全. 苔藓植物生态功能的研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1939-1942.

[4] 姜炎彬, 邵小明. 苔藓植物分布及其物种多样性的研究评述. 武汉植物学研究, 2010, 28(3): 385-390.

[5] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980: 1-1375.

[6] 韩军旺, 王进, 张旭, 贾宏汝, 袁志良. 小秦岭国家级自然保护区植物群落数量分类与排序. 河南科学, 2015, 33(4): 547-552.

[7] 张文静, 张钦弟, 王晶, 冯飞, 毕润成. 多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较. 植物生态学报, 2015, 39(6): 586-592.

[8] 赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平. 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类-以古田山 24 公顷森林样地为例. 植物生态学报, 2010, 34(7): 761-769.

[9] De'ath G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. Ecology, 2002, 83(4): 1105-1117.

[10] 张荣, 刘彤. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类. 生态学报, 2012, 32(19): 6056-6066.

[11] 黄永涛, 姚兰, 艾训儒, 吕世安, 丁易. 鄂西南两个自然保护区亚热带常绿落叶阔叶混交林类型及其常绿和落叶物种组成结构分析. 植物生态学报, 2015, 39(10): 990-1002.

[12] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆博格达山地面生苔藓植被的数量分类与排序研究. 植物生态学报, 2002, 26(1): 10-16.

[13] Pescador D S, de Bello F, Valladares F, Escudero A. Plant trait variation along an altitudinal gradient in Mediterranean high mountain grasslands: controlling the species turnover effect. PLoS One, 2015, 10(3): e0118876.

[14] 朱源, 康慕谊, 江源, 刘全儒. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局. 植物生态学报, 2008, 32(3): 574-581.

[15] Koenig I, Feldmeyer-Christe E, Mitchell E A D. Comparative ecology of vascular plant, bryophyte and testate amoeba communities in four *Sphagnum* peatlands along an altitudinal gradient in Switzerland. Ecological Indicators, 2015, 54: 48-59.

[16] He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(1): 91-99.

[17] 蔺菲, 郝占庆, 李步杭, 叶吉, 戴冠华, 张健, 倪伟东. 长白山暗针叶林苔藓植物群落特征与林木更新的关系. 生态学报, 2007, 27(4): 1308-1314.

[18] 刘蔚秋, 戴小华, 王永繁, 雷纯义. 影响广东黑石顶树附生苔藓分布的环境因子. 生态学报, 2008, 28(3): 1080-1088.

[19] 王中生, 安树青, 方炎明. 苔藓植物生殖生态学研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2444-2452.

[20] 福英, 白学良, 张乐, 毕庚辰, 冯超, 寇瑾, 萨如拉. 五大连池火山熔岩地貌苔藓植物对土壤养分积累的作用. 生态学报, 2015, 35(10): 3288-3297.

[21] 贾宏汝. 环境空间异质性对暖温带-北亚热带过渡区植物群落构建的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.

[22] De'Ath G. mvpart: multivariate partitioning. R package version 1.2-4. 2006.

[23] Patiño J, Gonzúlez-Mancebo J M. Exploring the effect of host tree identity on epiphyte bryophyte communities in different Canarian subtropical cloud forests. Plant Ecology, 2011, 212(3): 433-449.

[24] MHH W H. Vegan: Community Ecology Package. *R package version*, 2-0. 2011.

[25] Fox J, Weisberg S. Using car functions in other functions. 2013.

[26] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.

[27] 汪岱华, 王幼芳, 左勤, 李敏, 魏倩倩, 李晓芹, 赵明水. 浙江西天目山 30 年来苔藓物种多样性变化. 生物多样性, 2013, 21(2): 170-176.

[28] Lieberman D, Lieberman M, Peralta R, Hartshorn G S. Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica.

Journal of Ecology, 1996, 84(2): 137-152.

[29] Auslander M, Nevo E, Inbar M. The effects of slope orientation on plant growth, developmental instability and susceptibility to herbivores. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3): 405-416.

[30] Ferrer-Castán D, Vetaas O R. Pteridophyte richness, climate and topography in the Iberian Peninsula: comparing spatial and nonspatial models of richness patterns. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(2): 155-165.

[31] Stehn S E, Webster C R, Glime J M, Jenkins M A. Elevational gradients of bryophyte diversity, life forms, and community assemblage in the southern Appalachian Mountains. Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(11): 2164-2174.

[32] 陈云, 王海亮, 韩军旺, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠, 袁志良. 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局. 生态学报, 2014, 34(8): 2068-2075.

附表 小秦岭自然保护区苔藓植物物种名录和区系分布

Appendix Bryophytes species list and fauna distribution in Xiaoqinling National Nature Reserve

物种 Species	区系类型 Floristic type	物种 Species	区系类型 Floristic type
薄囊藓 *Leptobryum pyriforme*	世界广布	大金灰藓 *Pylaisiella robusta*	东亚分布(中-日)
兜叶细鳞苔 *Lejeunea cavifolia*	北温带分布	短肋羽藓 *Thuidium kanedae*	东亚分布(中-日)
反纽藓 *Timmiella anomala*	旧世界温带分布	灰白青藓 *Brachythecium albicans*	北温带分布
亮叶绢藓 *Entodon aeruginosus*	中国特有	鳞叶藓 *Taxiphyllum taxirameum*	热带亚洲至热带美洲分布
拟三列真藓 *Bryum pseudotriquetrum*	温带地区广布	圆叶匐灯藓 *Plagiomnium vesicatum*	旧世界温带分布
圆枝青藓 *Brachythecium garovaglioides*	东亚分布(中-日)	长肋青藓 *Brachythecium populeum*	北温带分布
白氏藓 *brotherus leana*	中国广布	钝叶绢藓 *Entodon obtusatus*	东亚分布
全缘匐灯藓 *Plagiomnium integrum*	热带亚洲分布	细叶小羽藓 *Haplocladium microphyllum*	北温带分布
仙鹤藓多蒴变种 *Atrichum var. gracilisetum besch*	北半球广布	北方金灰藓 *Pylaisiella sewynii*	北温带分布
侧枝匐灯藓 *Plagiomnium maximovicgii*	北温带分布	脆枝青藓 *Brachythecium thraustum*	中国特有
大凤尾藓 *Fissidens nobilis*	温带亚洲分布	短叶毛锦藓 *Pylaisiadelpha yokohamae*	东亚分布(中-日)
毛尖青藓 *Brachythecium piligerum*	东亚分布(中-日)	密枝青藓 *Brachythecium amnicola*	中国特有
青藓 *Brachythecium pulchellum*	东亚分布(中-日)	疏网美喙藓 *Eurbynchuium laxirete*	东亚分布(中-日)
网孔凤尾藓 *Fissidens areolatus*	温带亚洲分布	圆叶裂萼苔 *chiloscyphus horikawana*	东亚分布(中-日)
褶叶小墙藓 *Weisiopsis anomala*	东亚分布(中-日)	大羽藓 *Thuidium cymbifolium*	东亚分布
东亚小石藓 *Weisia exserta*	东亚分布	娇美绢藓 *Entodon pulchellus*	东亚分布
具丝毛灯藓 *Rhizomnium tuomikoskii*	东亚分布(中-日)	宽叶青藓 *Brachythecium curtum*	世界广布
绿枝青藓 *Brachythecium*	中国特有	扭尖美喙藓 *Eurhynchium kirishimense*	东亚分布(中-日)
平叶原鳞苔 *Archilegeunea planiuscula*	热带亚洲至热带大洋洲分布	陕西鳞叶藓 *Taxiphyllum giraldii*	东亚分布(中-日)
小胞仙鹤藓 *Atrichum rhystophyllum*	东亚分布(中-日)	长帽绢藓 *Entodon dolichocucullatus*	中国特有
八齿碎米藓 *Fabronia ciliaris*	中国特有	东亚缩叶藓 *Ptychomitrium fauriei*	东亚分布
匐枝青藓 *Brachythecium procumbens*	东亚分布	美灰藓 *Eurohypnum leptothallum*	温带亚洲分布
大叶匐灯藓 *Plagiomnium succulentum*	温带亚洲分布	灰青藓 *Brachythecium glauculum*	中国特有
尖叶青藓 *Brachythecium coreanum*	东亚分布	长叶提灯藓 *Mnium lycopodioides*	世界广布
阔叶丛本藓 *Anoectangium clarum*	温带亚洲分布	平肋提灯藓 *Mnium laevinerve*	温带亚洲分布
齿边同叶藓 *Isopterygium serrulatum*	温带亚洲分布	威氏缩叶藓 *Ptychomitrium wilsonii*	东亚分布(中-日)
羽枝青藓 *Brabhythecium piumosum*	北温带分布	圆叶提灯藓 *Plagiomnium vesicatum*	东亚分布(中-日)
东亚仙鹤藓 *Atrichum yakushimense*	东亚分布	尖叶匐灯藓 *Plagiomnium acutum*	温带亚洲分布
绿叶绢藓 *Entodon viridulus*	东亚分布(中-日)	绒叶青藓 *Brachythecium uncinifolium*	北温带分布
柔叶青藓 *Brachythecium moriense*	东亚分布(中-日)	剑叶藓 *Merceyopsis sikkimensis*	热带亚洲分布
曲枝青藓 *Brachythecium dicranoides*	中国特有	日本细喙藓 *Rhynchostegiella japonica*	东亚分布(中-日)
小酸土藓 *Oxystegus cuspidatus*	温带亚洲分布	斜枝青藓 *Brachythecium campylothallum*	中国广布
异形凤尾藓 *Fissidens anomalus*	北温带亚洲	齿边细枝藓 *Lindbergia serrulatus*	中国特有(西南成分)
银藓 *Anomobryum filiforme Solms*	世界广布	叉肋藓 *Teachyphyllum inflexum*	旧世界热带分布
粗肋薄罗藓 *Leskea scabrinervis*	中国特有	横生绢藓 *Entodon prorepens*	东亚分布

续表

物种 Species	区系类型 Floristic type	物种 Species	区系类型 Floristic type
毛尖羽藓 *Thuidium philibertii*	亚热带山区	拟圆叶剪叶苔 *Jungermannia* (*S.*) *pseudocyclops* Inoue	中国特有
狭叶湿地藓 *Hyophila stenophylla*	东亚分布(中-日)	芽胞湿地藓 *HyophilaBrid javanica*	东亚分布(中-日)
毛尖燕尾藓 *Bryhnia trichomitria*	东亚分布(中-日)	扭尖美喙藓 *Eurhynchium kirishimense* Takaki	东亚分布(中-日)
球根真藓 *Bryum radiculosum*	世界广布(除澳洲)	小细柳藓 *Platydictya subtilis*	世界广布
羽枝美喙藓 *Eurbynchuium longirameum*	中国特有	真藓 *Bryum argenteum*	世界广布
皱叶小石藓 *Weisia controversa*	世界广布	密根多毛藓 *Lescuraea radicosa*	北温带分布
南亚同叶藓 *Isopterygium bancanum*	温带亚洲分布	暖地明叶藓 *Vesicularia ferriei*	东亚分布(中-日)
凸尖鳞叶藓 *Taxiphyllum cuspidifolium*	东亚-北美间断分布	小仙鹤藓 *Atrichum henryi*	东亚分布(中-日)
原叶细鳞苔 *Lejeunea sordida*	世界广布	暗绿多枝藓 *Haplohymenium triste*	北温带分布
匐灯藓 *Plagiomnium cuspidatum*	北温带分布	宽叶美喙藓 *Eurhynchium hians*	旧世界温带分布
柳叶藓原变种 *Amblystegium serpens*	世界广布	细柳藓 *Platydictya jungermannioides*	北温带分布
细枝薄罗藓 *Leskea gracilescens*	东亚-北美间断分布	芽孢湿地藓 *Hyophila propagulifera*	东亚分布(中-日)
中华附干藓 *Schwetschkea sinica*	中国特有	短月藓 *Brachymenium nepalense*	热带亚洲至热带非洲分布
华东反齿藓 *Anacamptodon fortunei mitt*	东亚分布(中-日)	剑叶大帽藓 *Encalypta apathulata*	世界广布
泛生丝瓜藓 *Pohlia cruda*	世界广布	陕西灰藓 *Hypnum shensianum*	中国特有
薄边毛灯藓 *Rhizomnium horikawae*	温带亚洲分布	匐枝长喙藓 *Rhynchostegium serpenticaule*	中国特有
毛齿匐灯藓 *Plagiomnium tezukae*	东亚分布(中-日)	密集匐灯藓 *Plagiomnium conferteidens*	旧世界温带分布
小牛舌藓全缘亚种 *Andmodon minor* var. *integerrimus*	温带亚洲分布	羊角藓 *Herpetineuron toccoae*	热带亚洲至热带美洲分布
粗枝藓 *Gollania neckerella*	东亚分布(中-日)	大墙藓 *Tortula princeps*	世界广布
小树平藓 *Homaliodendron exiguum*	北温带亚洲	多疣麻羽藓 *Claopodium pellucinerve*	东亚分布
拟附干藓 *Schwetschkeopsis fabronia*	东亚-北美间断分布	细湿藓稀齿变种 *Campylium hispidulum*	世界广布
小凤尾藓 *Fissidens bryoides*	北半球广布	小凤尾藓原变种 *Fissideus bryoides var. bryouides*	北温带分布
小叶美喙藓 *Eurbynchuium filiforme*	中国特有	羽叶凤尾藓 *Fissidens plagiochloides*	东亚分布
短枝燕尾藓 *Bryhnia brachycladula*	东亚分布(中-日)	土生真藓 *Bryum tuberosum*	东亚分布
皱叶牛舌藓 *Anomodon dentatus*	北温带分布	树形疣灯藓 *Trachycystis ussuriensis*	温带亚洲分布
燕尾藓 *Bryhnia nocae-angliae*	北温带分布	直叶凤尾藓 *Fissidens strictulus*	东亚分布
光萼叶苔 *Jungermannia leiantha*	北温带分布	尖叶绢藓 *Entodon acutifolius*	中国特有
卷叶凤尾藓 *Fissidens cristatus*	旧世界温带分布	牛舌藓 *Anomodon viticulosus*	旧世界温带分布
柔软明叶藓 *Vesicularia flaccida*	东亚分布(中-日)	丛生真藓 *Bryum caespiticium*	世界广布
耳叶丛藓 *Pottia truncata*	中国特有	皮叶苔 *Targionia hypophylla*	世界广布
异叶小羽藓 *Haplocladium larminatii*	东亚分布	羽状青藓 *Brachythecium plumosum*	北半球广布
多褶耳叶苔 *Frullania polyptera*	热带亚洲分布	狭叶小羽藓 *Haplocladium angustifolium*	旧世界温带分布
长柄绢藓 *Entodon macropodus*	世界广布	丛本藓 *Anoectangium aestivum*	北温带分布
多毛细羽藓 *Cyto-hypnum vestitissimum*	北温带分布	密叶美喙藓 *Eurhynchium savatieri* Schimp	东亚分布(中-日)
拟同叶藓 *Isopterygiopsis muelleriana*	世界广布	扭叶丛本藓 *Anoectangium stracheyanum*	温带亚洲分布
温带灰藓强弯亚种 *Hypnum subimponens*	东亚分布(中-日)	狭叶拟绢藓 *Entodontopsis wightii*	北温带亚洲
斜蒴藓 *Camptothecium*	世界广布	大粗枝藓 *Gollania robusta*	中国特有
大麻羽藓 *Claopodium assurgens*	亚热带低山区	多变粗枝藓 *Gollania varians*	东亚分布
细麻羽藓 *Claopodium gracillimum*	东亚分布	狭叶美喙藓 *Eurhynchium coarctum*	中国特有
狭叶仙鹤藓 *Atrichum angustatum*	中国、欧洲、北美洲	紫色细湿藓 *Campylium prophyriticum*	中国特有
链齿藓 *Desmatodon latifolius*	中国特有	齿边缩叶藓 *Ptychomitrium dentatum*	东亚分布
钝叶牛舌藓 *Anomodon rotundatus*	中国特有	拟小凤尾藓 *Fissidens tosaensis*	东亚分布(中-日)
深绿绢藓 *Entodon luridus*	东亚分布	小牛舌藓原变种 *Andmodon minor* var. *minor*	东亚-北美间断分布
陈氏耳叶苔 *Frullania chenii*	中国特有	长叶绢藓 *Entodon longifolius*	热带亚洲分布

续表

物种 Species	区系类型 Floristic type	物种 Species	区系类型 Floristic type
赤根青藓 *Brachythecium dicranoides*	旧世界温带分布	虫毛藓 *Boulaya mittenii*	东亚分布
多疣细羽藓 *Cyrto-hypnum pygmaeum*	东亚-北美间断分布	高山红叶藓 *Bryoerythrophyllum alpigenum*	旧世界温带分布
毛灯藓 *Rhizomnium punctatum*	北温带分布	褶叶青藓 *Brachythecium salebrosum*	北温带分布
尖毛细羽藓 *Cyto-hypnum fuscatum*	温带亚洲分布	细枝羽藓 *Thuidium delicatulum*	世界广布
细枝藓 *Lindbergia brachyptera*	北温带分布	具缘提灯藓 *Mnium marginatum*	世界广布
东亚拟鳞叶藓 *Pseudotaxiphyllum pohliaecarpum*	东亚分布(中-日)	短叶小石藓 *WeisiaHedw controversaHedw*	中国特有
卷叶毛口藓 *TrichostomumBruch brachydontiumBruch*	中国特有	毛口藓 *Trichostomum brachydontium*	世界广布
狭叶长喙藓 *Rhynchostegium fauriei*	东亚分布(中-日)	斜枝长喙藓 *Rhynchostegium inclinatum*	东亚分布(中-日)
延叶凤尾藓 *Fissidens perdecurrens*	东亚分布(中-日)	长尖明叶藓 *Vesicularia reticulata*	热带亚洲分布
美丽长喙藓 *Rhynchostegium subspeciosum*	中国特有	丝瓜藓 *Pohlia nutans*	世界广布
尖叶美喙藓 *Eurhynchium eustegium*	东亚分布(中-日)	绿叶绢藓 *Entodon viridulus*	东亚分布
提灯藓 *Mnium hornum*	世界广布	狭边大叶藓 *Rhodobryum ontariense*	北温带亚洲
中华裂萼苔 *Chiloscyphus sinensis*	中国特有	皱叶粗枝藓 *Gollania ruginosa*	温带亚洲分布
薄罗藓 *Leskea polycarpa*	北温带分布	垂蒴棉藓 *Plagiothecium nemorale*	热带亚洲分布
台湾棉藓原变种 *Plagiothecium formosicum*	中国特有	长尖扭口藓 *Barbula unguiculata*	中国特有
短枝羽藓 *Thuidium submicropteris*	东亚分布(中-日)	阔叶桧藓 *Pyrrhobryum latifolium*	热带亚洲至热带美洲分布
瘤根真藓 *Bryum bornholmense*	中国、欧洲	陈氏唇鳞苔 *Cheiloeunea chenii*	中国特有
狭叶扭口藓 *Barbula subcontorta*	北温带亚洲	阔边大叶藓 *Rhodobryum giganteum*	温带亚洲分布
金灰藓 *Pylaisiellapolyantha*	北温带分布	木藓 *Thamnobryum subseriatum*	东亚分布
瓦叶藓 *Miyabea frutcella*	东亚分布(中-日)	细罗藓 *Leskeella nervosa*	北温带分布
细湿藓原变种 *Campylium hispidulum*	世界广布	糙叶美喙藓 *Eurhynchium squarrifolium*	东亚分布(中-日)
具喙匐灯藓 *Plagiomnium rhynchophorum*	泛热带分布	戟叶梳藓 *Ctenidium hastile*	东亚分布(中-日)
水生长喙藓 *Rhynchostegium riparioides*	北半球广布	中华粗枝藓 *Gollania sinensis*	中国特有
橙色锦藓 *Sematophyllum phoeniceum*	热带亚洲-热带非洲分布	东亚小羽藓 *Haplocladium strictulum*	东亚分布(中-日)
刺叶提灯藓 *Mnium spinosum*	世界广布	短萼叶苔 *Jungermannia breviperianthia*	中国特有
密毛细羽藓 *Cyrto-hypnum gratum*	旧世界热带分布	中华细枝藓 *Lindbergia sinensis*	中国特有
脆枝曲柄藓原变种 *campylopus fragilis*	北温带分布	锐齿短萼苔 *Wettsteinia inversa*	东南亚分布
蛇苔 *Conocephalum conicum*	北半球广布	树状美喙藓 *Eurbynchuium arbuscula*	东亚分布(中-日)
酸土藓 *Oxystegus cuspidatus*	世界广布	皱叶绢藓 *Entodon plicatus*	东亚分布
淡色同叶藓 *Isopterygium albescens*	温带亚洲分布	扭叶镰刀藓 *Drepanocladus revolvens*	北半球寒温带
皱叶麻羽藓 *Claopodium rugulosifolium*	中国特有	弯叶灰藓 *Hypnum hamulosum*	欧亚大陆共有
侧立藓 *pleuroweisia schliephackei*	欧亚大陆共有	钝叶平蒴藓 *Plagiobrym giraldii*	中国特有
尖叶提灯藓 *Plagiomnium acutum*	北温带分布	弯叶青藓 *Brachythecium reflexum*	北温带分布
异叶提灯藓 *Mnium heterophyllum*	北温带分布	皱叶匐灯藓 *Plagiomnium arbusculum*	东亚分布(中-日)
东亚金灰藓 *Pylaisiella brotheri*	东亚分布	芽胞裂萼苔 *Chiloscyphus minor*	北半球广布
偏蒴藓 *Ectropothecium buitenzorgii*	热带亚洲分布	湿柳藓 *Hygroamblystegium tenax*	世界广布
带叶牛舌藓 *Anomodon perlingulatus*	中国特有	红毛细羽藓 *Cyto-hypnum versicolor*	中国特有
墙藓 *Tortula subulata*	北温带分布	鞭枝多枝藓 *Haplohymenium Flagelliforme*	温带亚洲分布
短尖美喙藓 *Eurhynchium angustirete*	东亚分布	短尖燕尾藓 *Bryhnia hultenii*	东亚分布(中-日)
褶叶小墙藓 *Hyophila anomala*	东亚分布(中-日)	楔形耳叶苔 *Frullania inflexa*	东亚分布
疣灯藓 *Trachycystis microphylla*	东亚分布	圆条棉藓原变种 *Plagiothecium cavifolium*	世界广布